МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 535.31, 681.7.06 DOI 10.12737/10387

Угловые селективные характеристики светопропускания решеточного оптического фильтра*

Р. С. Закируллин**
Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Российская Федерация

Angular selective light transmission characteristics of a grating optical filter ***

R. S. Zakirullin**
Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

Исследованы решеточные оптические фильтры с целью определения степени влияния геометрических параметров решеток на угловые характеристики светопропускания. Решетки образованы чередующимися пропускающими и поглощающими полосами. Относительное расположение двух решеток обеспечивает угловую селективность светопропускания. Для достижения поставленной цели разработан графоаналитический метод, позволяющий рассчитывать угловую характеристику светопропускания фильтра в виде зависимости коэффициента светопропускания от угла падения лучей. Установлено влияние характеристического угла фильтра (данный угол определяет сдвиг решеток на входной и выходной поверхностях), шагов полос (шаг полос на каждой решетке равен суммарной ширине двух соседних чередующихся полос) и кратности шагов (отношение шагов полос входной и выходной решеток) на угловые характеристики светопропускания. В диапазоне углов падения от 0° до 60° характеристики фильтров на участках убывания и возрастания коэффициента светопропускания эквидистантны, линейны и практически симметричны относительно характеристических углов фильтров. При больших углах падения эквидистантность, линейность и симметричность характеристик нарушаются. Полученные закономерности необходимо учитывать при определении геометрических параметров фильтров, удовлетворяющих требуемым для конкретной остекленной конструкции и заранее заданным угловым характеристикам светопропускания. Целесообразно применение фильтра в областях, где требуется регулирование светопропускания при изменении угла падения лучей вследствие движения источника света и/или остекленного объекта друг относительно друга, прежде всего в архитектурном остеклении.

Ключевые слова: оптический фильтр, решетка с чередующимися полосами, графоаналитический расчет, угловая характеристика светопропускания.

The grating optical filters are investigated to determine the degree of impact of the geometric grating parameters on the angular characteristics of the light transmission. The filter consists of a plane-parallel transparent substrate with thin-layer gratings on two surfaces. The gratings are formed by alternating transmitting and absorption bands. The relative position of two gratings provides angular selectivity of the light transmission. A graphic-analytical method is developed to determine the angular characteristic of the filter light transmission in the form of the dependence of the light transmission coefficient on the beams incidence angle. The effect of a filter characteristic angle (this angle determines a shift of the gratings on the input and output surfaces), fringe spacing (fringe spacing on each grating is equal to the total width of two adjacent alternating bands), and fringe ratio (relation of the fringe spacing of the input and output gratings) on the angular characteristics of the light transmission. The filter characteristics in the areas of decreasing and increasing transmittance are equidistant, linear, and symmetrical with respect to the characteristic angles of the filters in the range of the incidence angles from 0° up to 60°. At large incidence angles, equidistance, linearity, and symmetry of the characteristics are violated. The obtained regularities should be considered when determining the geometrical parameters of the filters satisfying the required for the specified glazed construction and the preset angular characteristics of the light transmission. It is advisable to apply the filter in the areas where the light transmission control is needed at the change of the beams incidence angle due to the movement of a light source and/or a glazed object relative to each other, especially in architectural glazing.

Keywords: optical filter, grating with alternating bands, graphic-analytical calculation, angular characteristic of light transmission.

Введение. Классические тонкопленочные многослойные фильтры [1] имеют оптически однородное в каждом слое покрытие поверхности прозрачной среды. Известны неоднородные покрытия с тонкими микропористыми рассеиваю-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** e-mail: rustam.zakirullin@gmail.com

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

щими пленками [2], а также с металлическими пленками с квадратными отверстиями размерами порядка длин световых волн [3]. В оптических фильтрах используются дифракционные решетки [4, 5] и фотонные кристаллы [6, 7]. Перспективы применения имеют наноструктурированные метаматериалы [8]. Перечисленные поверхностные и объемные неоднородности являются микро- и наноразмерными, поэтому расчет характеристик фильтров основан на методах физической оптики [9, 10].

Традиционные области применения оптических фильтров — аналоговая кино-, фото- и телевизионная техника, осветительные системы и другие — в последние десятилетия расширились до интерферометрии, спектроскопии, цифровой техники, волоконно-оптических систем связи, анализаторов структуры ДНК и геномов, лазерных систем и т. д. Среди всего многообразия оптических фильтров отсутствуют пропускающие только требуемую и предварительно рассчитанную часть падающего излучения в разных диапазонах углов падения. Разработка такого фильтра основана на новом способе регулирования направленного светопропускания, защищенном патентом Российской Федерации [11].

Устройство, принцип действия и основы расчета фильтра с угловой селективностью светопропускания описаны в [12]. Фильтр состоит из прозрачной плоскопараллельной подложки с тонкослойными решеточными слоями на двух поверхностях. Входная и выходная решетки образованы направленно пропускающими полосами, чередующимися с поглощающими, отражающими или рассеивающими полосами. Аналогично периоду дифракционной решетки каждая решетка фильтра характеризуется шагом полос — суммарной шириной двух соседних полос. Кратность шагов равна отношению шагов полос на входной и выходной решетках. Селективность светопропускания фильтра обеспечивается за счет взаимного расположения направленно пропускающих полос входной и выходной поверхностей — при изменении углов падения меняется доля излучения, проходящего через обе решетки фильтра. Характеристический угол фильтра определяет сдвиг решеток друг относительно друга.

Благодаря миллиметровым и субмиллиметровым ширинам чередующихся полос (размерам поверхностных неоднородностей), в отличие от [2–8], оптические характеристики фильтра можно рассматривать исключительно в пределах геометрической оптики. Соответственно, упрощается и метод расчета этих характеристик по сравнению с известными методами [9, 10]. Графоаналитический метод расчета зависимости коэффициента светопропускания фильтра от угла падения основан на функции смещения преломленного луча [13]. Функция представляет собой угловую зависимость смещения преломленного луча на выходной поверхности фильтра относительно непреломленного луча при нормальном угле падения.

При заранее известной траектории движения источника света относительно фильтра его угловые характеристики можно предварительно адаптировать к изменению углов падения лучей, что отличает этот фильтр от всех существующих. Алгоритм расчета геометрических параметров решеточного оптического фильтра с заданной угловой селективной характеристикой светопропускания представлен в [14, 15]. В [14, 16] описан метод оптимизации фильтрования солнечного излучения оконными конструкциями.

Статья посвящена исследованию влияния характеристического угла фильтра, шагов полос входной и выходной решеток и кратности шагов на угловые характеристики регулирования направленного светопропускания.

Геометрические параметры решеточного фильтра и метод расчета угловых характеристик светопропускания. На рис. 1 приведена расчетная схема плоскопараллельного решеточного фильтра с чередующимися пропускающими и поглощающими полосами (изображены тонкими и толстыми линиями соответственно). Показатель преломления и толщина стекла подложки n = 1,5 и s = 4 мм. Характеристический угол фильтра $\square_c$ = 30° (луч при этом угле падения проходит через центры чередующихся полос входной и выходной решеток). Преломленный луч при характеристическом угле фильтра смещается на расстояние l_c. Указаны лучи, преломленные под углами $\square_n$, для углов падения от 0° до 90° через каждые 10° и для угла 45°. Эти лучи показывают границы направленного светопропускания через входную решетку фильтра в пределах одного шага полос. Ширины пропускающих и поглощающих полос соответственно равны: t_1 = 3 мм и t_2 = 1 мм на входной решетке, t_3 = 2,5 мм и t_4 = 1,5 мм на выходной решетке. Шаги полос на обеих поверхностях одинаковы: $t_1 + t_2 = t_3 + t_4$ = 4 мм. Кратность шагов равна $(t_1 + t_2) / (t_3 + t_4)$ = 1.

При графоаналитическом расчете [12, 13] коэффициент светопропускания Θ плоскопараллельного фильтра рассчитывается по формуле

$$\tau = h / (t_1 + t_2), \quad (1)$$

где h — ширина светопропускания (общая ширина той части пропускающих полос выходной решетки, через которую преломленные лучи проходят направленно в пределах одного шага полос) при данном угле падения Θ.

Ширина светопропускания определяется [13] на основе функции смещения $l(\Theta)$ преломленного луча

$$l = \frac{s\sin\Theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\Theta}}. \tag{2}$$

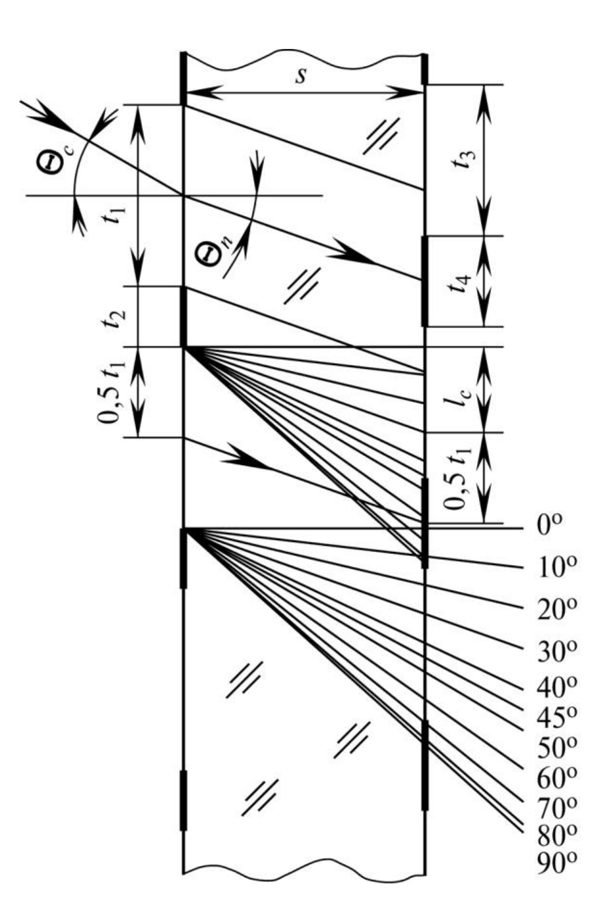


Рис. 1. Расчетная схема решеточного фильтра

При анализе рис. 1 выделены четыре диапазона [12] с одинаковым характером изменения ширины светопропускания (диапазоны разделены экстремальными углами падения, для которых в скобках указаны равенства для точного определения их значений):

1) От 0° до 14,22° ($l = -0{,}5t_1 + 0{,}5t_4 + l_c$) ширина светопропускания уменьшается: $h = 0{,}5t_1 - 0{,}5t_4 + l_c - l$;

2) От 14,22° до 45,55° ($l = 0{,}5t_1 - 0{,}5t_4 + l_c$) ширина светопропускания постоянна: $h = t_1 - t_4$;

3) От 45,55° до 68,53° ($l = -0{,}5t_1 + t_3 + 0{,}5t_4 + l_c$) ширина светопропускания увеличивается: $h = 0{,}5t_1 - 0{,}5t_4 - l_c + l$;

4) От 68,53° до 90° ширина светопропускания постоянна: $h = t_3$.

Точные значения экстремальных углов падения определяются из формулы (2) через функцию арксинус путем подстановки соответствующих вычисленных значений смещений. Коэффициенты светопропускания для углов падения от 0° до 90° рассчитываются по формуле (1) с подстановкой значений ширины светопропускания, полученных по расчетным формулам для каждого из четырех диапазонов регулирования.

В табл. 1 приведены параметры 10 фильтров, коэффициенты светопропускания которых рассчитаны по описанному графоаналитическому методу (параметры рассмотренного фильтра внесены под № 1). Результаты расчета фильтров № 1, № 3, № 7, № 9 и № 10 подтверждены экспериментально [15, 17].

Фильтры № 1–5 в табл. 1 имеют разные характеристические углы, фильтры № 1 и № 6–8 отличаются друг от друга значениями шагов полос на двух решетках. У фильтров № 1, № 9 и № 10 разные кратности шагов. Остальные параметры в каждом из трех случаев одинаковы для всех фильтров. Угловые характеристики фильтров — зависимости коэффициента светопропускания от углов падения — строятся по результатам графоаналитических расчетов.

Таблица 1

Геометрические параметры фильтров

№ фильтра	Характеристический угол Θ_c, град.	Ширина полосы, мм				Шаг полос, мм		Кратность шагов
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_1+t_2	t_3+t_4	$\frac{t_1+t_2}{t_3+t_4}$
1	30	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0
2	10	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0
3	45	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0
4	60	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0
5	80	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0
6	30	2,00	1,00	1,50	1,50	3,0	3,0	1,0
7	30	3,00	2,00	2,50	2,50	5,0	5,0	1,0
8	30	6,00	2,00	5,00	3,00	8,0	8,0	1,0
9	30	3,00	1,00	1,25	0,75	4,0	2,0	2,0
10	30	3,00	1,00	0,50	0,3	4,0	0,8	5,0

Исследование зависимости коэффициента светопропускания от характеристического угла фильтра. На рис. 2 приведены угловые характеристики светопропускания фильтров № 1–5 с разными характеристическими углами.

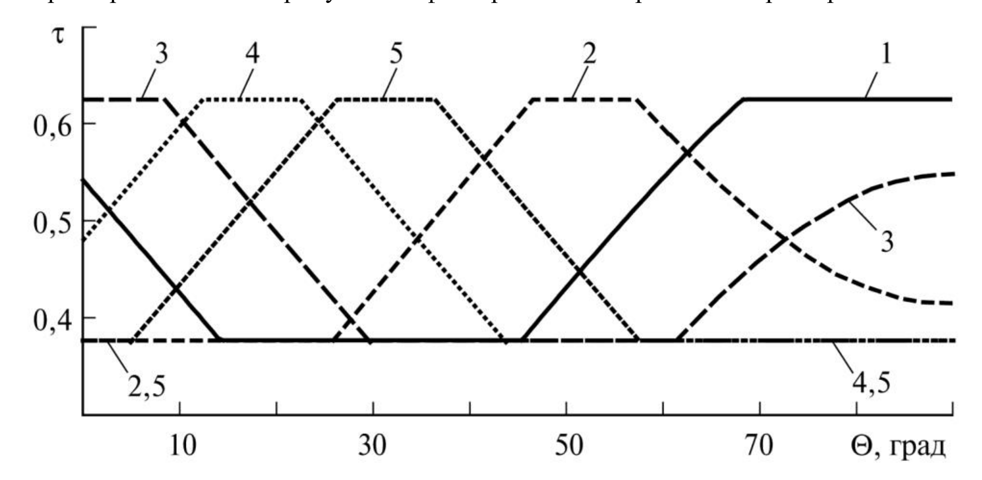


Рис. 2. Угловые характеристики светопропускания фильтров № 1–5 с характеристическими углами 30°, 10°, 45°, 60° и 80° соответственно

В результате графоаналитического исследования зависимости коэффициента направленного светопропускания от характеристических углов фильтров в диапазоне углов падения от 0° до 90° можно сделать следующие выводы.

1. В диапазоне углов падения от 0° примерно до 60° характеристики светопропускания практически эквидистантно сдвигаются по оси абсцисс (углов падения) при изменении характеристического угла. Эквидистантность линий объясняется тем, что в расчетных формулах ширины светопропускания для участков убывания и возрастания на ее изменение влияют только значения смещений преломленных лучей при текущих углах падения, не зависящие от характеристического угла фильтра. При более точном рассмотрении эквидистантность в данном угловом диапазоне

незначительно нарушается из-за нелинейности угловой зависимости смещения преломленного луча в соответствии с формулой (2). При больших углах падения эквидистантность линий нарушается значительно.

2. Участки возрастания и убывания характеристик всех пяти фильтров при углах падения от 0° примерно до 60° практически линейны, при больших углах падения — примерно от 60° до 90° — регулирование в зависимости от угла падения ослабевает — линии или горизонтальны (линии 1, 4 и 5), или искривляются сильнее и становятся более пологими (линии 2 и 3). В расчетных формулах возрастания или убывания ширины светопропускания на ее изменение влияют только величины смещений преломленных лучей, рассчитанных по формуле (2) с синусоидальной зависимостью. А рост значений синусов углов по мере увеличения значений самих углов, как известно, замедляется. Кроме того, изменение разности смещений преломленных лучей в расчетных формулах становится все менее значимым по сравнению с абсолютными значениями ширин чередующихся полос.

3. В диапазоне углов падения от 0° примерно до 60° линии практически симметричны относительно характеристических углов фильтров. Формулы для расчета участков убывания и возрастания ширины светопропускания отличаются только знаками перед величинами смещений преломленного луча при характеристическом и расчетном углах падения ($l_c - l$ и $-l_c + l$). При более точном рассмотрении симметричность в данном угловом диапазоне незначительно нарушается из-за нелинейности зависимости смещения преломленного луча от угла падения в соответствии с формулой (2). При больших углах падения симметричность не соблюдается.

4. Горизонтальные участки характеристик фильтров при минимальном и максимальном светопропускании, находясь в разных угловых диапазонах, совпадают по значениям коэффициента светопропускания по причине одинаковых ширин всех чередующихся полос.

Исследование зависимости коэффициента светопропускания от шагов полос. На рис. 3 приведены угловые характеристики светопропускания фильтров № 1 и № 6–8, имеющих разные шаги полос на обеих решетках.

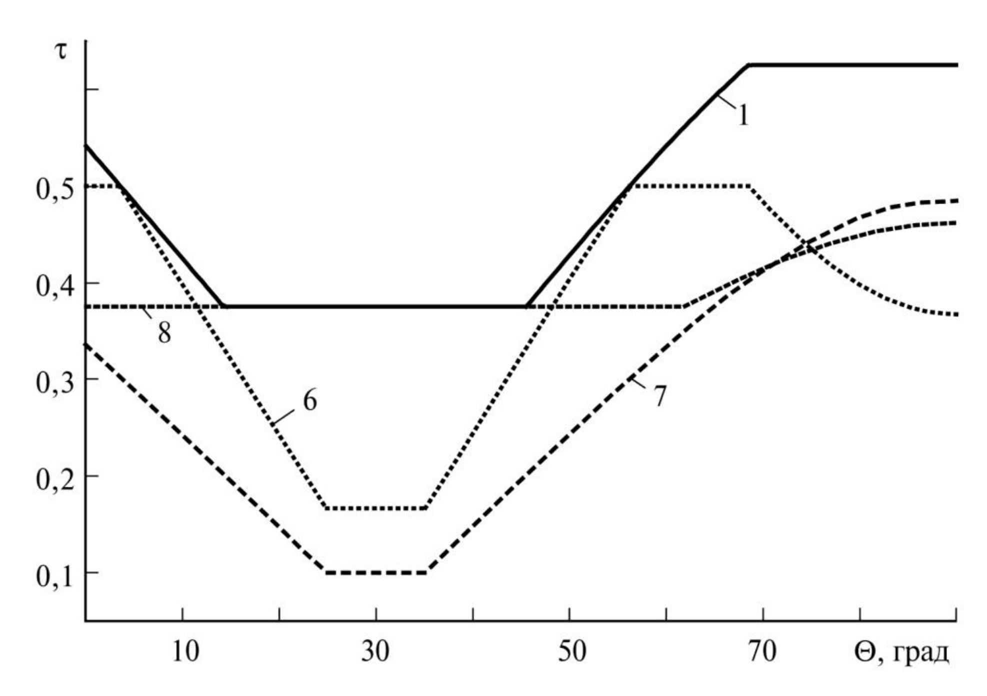


Рис. 3. Угловые характеристики светопропускания фильтров № 1 и № 6–8 с шагами полос 4, 3, 5 и 8 мм соответственно

Сравнение четырех характеристик светопропускания фильтров с разными шагами полос позволяет сделать следующие выводы.

1. Степень углового селективного регулирования (угол наклона участков убывания и возрастания коэффициента светопропускания) при единичной кратности шагов зависит только от значений шагов полос. На рис. 3 угловые характеристики фильтров с возрастанием шагов полос становятся более пологими, т. е. в одном и том же угловом диапазоне коэффициент светопропускания изменяется медленнее. На угол наклона участков убывания и возрастания влияют только значения разности смещений преломленных лучей при характеристическом угле фильтра и при расчетных углах падения. Эти разности в одном и том же угловом диапазоне одинаковы для всех фильтров. Тогда при

расчете по формуле (1) при одинаковом изменении числителя знаменатель с увеличением шага полос возрастает, что приводит к уменьшению изменения коэффициента светопропускания.

2. Сравнение характеристик фильтров № 1 и № 8 показывает, что при увеличении шагов полос на обеих решетках и, следовательно, ширин чередующихся полос (в данном случае оба шага и ширины всех полос увеличены в два раза) ослабляется степень регулирования и расширяются угловые диапазоны с одинаковым характером изменения коэффициента светопропускания. Для заданного показателя преломления материала подложки и ее толщины существуют оптимальные значения шагов и ширин полос, сравнимые со значениями смещений преломленных лучей, и при значительном их превышении регулирование практически прекратится (в расчетных формулах потеряется значимость слагаемых смещений по сравнению со слагаемыми ширин полос).

3. При изменении шагов полос линейность и эквидистантность участков возрастания и убывания всех линий и их симметричность относительно характеристического угла фильтра сохраняются при углах падения от 0° примерно до 60°. При больших углах падения, особенно при приближении к 90°, эти свойства нарушаются.

Исследование зависимости коэффициента светопропускания от кратности шагов. На рис. 4 приведены угловые характеристики светопропускания фильтров № 1, № 9 и № 10 с разной кратностью шагов полос.

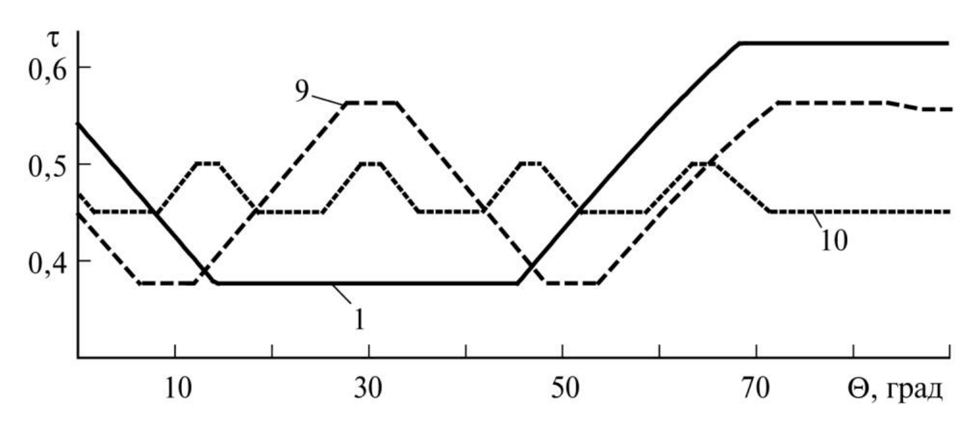


Рис. 4. Угловые характеристики светопропускания фильтров № 1, № 9 и № 10 с кратностью шагов 1, 2 и 5 соответственно

По результатам исследования зависимости светопропускания от кратности шагов можно сделать следующие выводы.

1. Эквидистантность, линейность и симметричность относительно характеристического угла на участках возрастания и убывания характеристик светопропускания в диапазоне углов падения от 0° примерно до 60° сохраняются при изменении кратности шагов полос (по указанным выше причинам).

2. При увеличении кратности шагов сужаются как диапазоны изменения коэффициента направленного светопропускания, так и угловые диапазоны регулирования. Количество «периодов» линий, напоминающих синусоиды, примерно равно кратности шагов. При более точном рассмотрении в данном диапазоне периодичность «волн» регулирования незначительно нарушается из-за нелинейности зависимости смещения преломленного луча от угла падения в соответствии с формулой (2).

Заключение. Исследование решеточных оптических фильтров для определения степени влияния геометрических параметров их решеток на угловые характеристики светопропускания позволяет сделать следующие выводы.

1. В диапазоне углов падения от 0° примерно до 60° характеристики фильтров на участках убывания и возрастания коэффициента светопропускания практически эквидистантны независимо от характеристических углов фильтров и кратности шагов при неизменных шагах полос. При изменении характеристического угла фильтра его характеристики эквидистантно сдвигаются вдоль оси углов падения. Степень углового регулирования зависит только от значений шагов полос — с их увеличением в одном и том же угловом диапазоне коэффициент светопропускания изменяется медленнее. Для заданного показателя преломления материала подложки и ее толщины существуют оптимальные значения шагов и ширин полос, сравнимые со значениями смещений преломленных лучей. При больших углах падения эквидистантность линий нарушается.

2. Участки возрастания и убывания характеристик фильтров при углах падения от 0° примерно до 60° практически линейны. При больших углах падения — примерно от 60° до 90° — степень углового регулирования ослабевает.

3. В диапазоне углов падения от 0° примерно до 60° линии практически симметричны относительно характеристических углов фильтров. При больших углах падения симметричность нарушается.

4. При увеличении кратности шагов сужаются как диапазоны изменения коэффициента светопропускания, так и угловые диапазоны регулирования. Количество «периодов» линий, напоминающих синусоиды, примерно равно кратности шагов.

Полученные закономерности необходимо учитывать при определении геометрических параметров фильтров, удовлетворяющих требуемым для конкретной остекленной конструкции и заранее заданным угловым характеристикам светопропускания.

Целью дальнейших исследований, проводимых в рамках НИР «Разработка оптических фильтров с поверхностными решетками для предадаптированного углового селективного регулирования направленного светопропускания», является поиск технологических решений для обеспечения практического применения полученных результатов. Архитектурное остекление является основной областью предполагаемого применения для регулирования проходящего в помещение светового потока в зависимости от угла падения солнечных лучей при сложной криволинейной траектории движения солнца.

Библиографический список

1. Macleod, H.-A. Thin-Film Optical Filters / H.-A. Macleod. — 4th ed. — Boca Raton : CRC Press, 2012. — 800 p.

2. Microporous phase-separated films of polymer blends for enhanced outcoupling of light from OLEDs / R. Liu [et al.] // Optics Express. — 2011. — Vol. 19. — P. A1272–A1280.

3. Yanzhong, C. Structured lens formed by a 2D square hole array in a metallic film / C. Yanzhong [et al.] // Optics Letters. — 2008. — V. 33. — P. 753–755.

4. Fehrembach, A.-L. Phenomenological theory of filtering by resonant dielectric gratings / A.-L. Fehrembach, D. Maystre, A. Sentenac // The Journal of the Optical Society of America. — 2002. — Vol. A 19, № 6. — P. 1136–1144.

5. Plasmonic critical angle in optical transmission through subwavelength metallic gratings / Z. Wang [et al.] // Optics Letters. — 2011. — Vol. 36, № 23. — P. 4584–4586.

6. Multi-channel and sharp angular spatial filters based on one-dimensional photonic crystals / S. Jiang [et al.] // Chinese Optics Letters. — 2006. — Vol. 4, № 10. — P. 605–607.

7. Wide-field-of-view narrow-band spectral filters based on photonic crystal nanocavities / W. Nakagawa [et al.] // Optics Letters. — 2011. — Vol. 27, № 3. — P. 191–193.

8. Симовский, К. Р. О материальных параметрах метаматериалов / К. Р. Симовский // Оптика и спектроскопия. — 2009. — Т. 107, № 5. — С. 766–793.

9. Mazilu, M. Modular Method for Calculation of Transmission and Reflection in Multilayered Structures / M. Mazilu, A. Miller, V. T. Donchev // Applied Optics. — 2001. — Vol. 40. — P. 6670–6676.

10. Periodic dielectric bars assisted enhanced transmission and directional light emission from a single subwavelength slit / Z.-B. Li [et al.] // Optics Letters. — 2006. — Vol. 14. — P. 8037–8042.

11. Способ регулирования направленного светопропускания : патент 2509324 Рос. Федерация : 6 G02B 5/20, E06B 9/24, G02B 1/10 / Р. С. Закируллин. — № 2012130148 ; заявл. 17.07.12 ; опубл. 10.11.12, Бюл. № 31. — 3 с.

12. Закируллин, Р. С. Способ углового селективного регулирования направленного светопропускания / Р. С. Закируллин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2013. — № 3 (85). — С. 17–22.

13. Закируллин, Р. С. Селективное регулирование направленного светопропускания по углам падения лучей / Р. С. Закируллин // Журнал технической физики. — 2012. — Т. 82, № 10. — С. 134–136.

14. Закируллин, Р. С. Расчет параметров оптического фильтра с угловым селективным светопропусканием / Р. С. Закируллин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2013. — № 5 (87). — С. 54–58.

15. Zakirullin, R. S. Grating optical filter for pre-adapted angular selective regulation of directional light transmission / R. S. Zakirullin // 8th Iberoamerican Optics Meeting and 1th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Applications. Proc. SPIE. — 2013. — Vol. 8785. — P. 15.

16. Закируллин, Р. С. Интеллектуальное окно как оптический фильтр с угловым селективным светопропусканием / Р. С. Закируллин // Науч. вестник Воронеж. гос. архитектурно-строит. ун-та. Архитектура и строительство. — 2014. — Вып. 1 (33). — С. 11–19.

17.Закируллин, Р. С. Оптический фильтр с угловой селективностью светопропускания / Р. С. Закируллин // Оптический журнал. — 2013. — Т. 80, вып. 8. — С. 16–24.

References

1. Macleod, H.-A. Thin-Film Optical Filters. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2012, 800 p.

2. Liu, R., et al. Microporous phase-separated films of polymer blends for enhanced outcoupling of light from OLEDs. Optics Express, 2011, vol. 19, pp. A1272–A1280.

3. Yanzhong, C., et al. Structured lens formed by a 2D square hole array in a metallic film. Optics Letters, 2008, vol. 33, pp. 753–755.

4. Fehrembach, A.-L., Maystre, D., Sentenac, A. Phenomenological theory of filtering by resonant dielectric gratings. The Journal of the Optical *Society* of America, 2002, vol. A 19, no. 6, pp. 1136–1144.

5. Wang, Z., et al. Plasmonic critical angle in optical transmission through subwavelength metallic gratings. Optics Letters, 2011, vol. 36, no. 23, pp. 4584–4586.

6. Jiang, S., et al. Multi-channel and sharp angular spatial filters based on one-dimensional photonic crystals. Chinese Optics Letters, 2006, vol. 4, no. 10, pp. 605–607.

7. Nakagawa, W., et al. Wide-field-of-view narrow-band spectral filters based on photonic crystal nanocavities. Optics Letters, 2011, vol. 27, no. 3, pp. 191–193.

8. Simovski, C.R. O material'nykh parametrakh metamaterialov. [Material parameters of metamaterials: a review).] Optics and Spectroscopy, 2009, vol. 107, no. 5, pp. 766–793 (in Russian).

9. Mazilu, M., Miller, A., Donchev, V.T. Modular Method for Calculation of Transmission and Reflection in Multilayered Structures. *Applied Optics*, 2001, vol. 40, pp. 6670–6676.

10. Li, Z.-B., et al. Periodic dielectric bars assisted enhanced transmission and directional light emission from a single subwavelength slit. Optics Letters, 2006, vol. 14, pp. 8037–8042.

11. Zakirullin, R.S. Sposob regulirovaniya napravlennogo svetopropuskaniya: patent 2509324 Ros. Federatsiya: 6 G02B 5/20, E06B 9/24, G02B 1/10. [Method of regulation for directional light: RF Patent no. 2509324: 6 G02B 5/20, E06B 9/24, G02B 1/10/] RF Patent, 2012 (in Russian).

12. Zakirullin, R.S. Sposob uglovogo selektivnogo regulirovaniya napravlennogo svetopropuskaniya. [Method of angular selective regulation for directional light.] Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2013, no. 3 (85), pp. 17–22 (in Russian).

13. Zakirullin, R.S. Selektivnoe regulirovanie napravlennogo svetopropuskaniya po uglam padeniya luchey. [Selective beam incidence angle control over directional light transmission.] Technical Physics, 2012, vol. 82, no. 10, pp. 134–136 (in Russian).

14. Zakirullin, R.S. Raschet parametrov opticheskogo fil'tra s uglovym selektivnym svetopropuskaniem. [Parameters calculation of optical filter with angular selective light transmission.] Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2013, no. 5 (87), pp. 54–58 (in Russian).

15. Zakirullin, R. S. Grating optical filter for pre-adapted angular selective regulation of directional light transmission. 8th Iberoamerican Optics Meeting and 1th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Applications. Proc. SPIE, 2013, vol. 8785, p. 15.

16. Zakirullin, R.S. Intellektual'noe okno kak opticheskiy fil'tr s uglovym selektivnym svetopropuskaniem. [Intelligent window as an optical filter with angular selective transmission.] Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture, 2014, iss. 1 (33), pp. 11–19 (in Russian).

17. Zakirullin, R.S. Opticheskiy fil'tr s uglovoy selektivnost'yu svetopropuskaniya. [Optical filter with angular selectivity of light transmission.] Journal of Optical technology, 2013, vol. 80, iss. 8, pp. 16–24 (in Russian).

Поступила в редакцию 10.09.2014
Сдана в редакцию 23.09.2014
Запланирована в номер 28.01.2015